

# 超小型コンデンサマイクロホンの設計法に関する研究

著者	利光 平大
号	187
発行年	1973
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11136">http://hdl.handle.net/10097/11136</a>

氏 名（本籍）	り 利	こう 光	やす 平	ひろ 大	（和歌山県）
学 位 の 種 類	工	学	博	士	
学 位 記 番 号	工	第	1 8 7	号	
学位授与年月日	昭 和	4 8	年	5 月	2 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当				
最 終 学 歴	昭和 3 3 年 3 月 東北大学工学部通信工学科卒業				
学 位 論 文 題 目	超小型コンデンサマイクロホンの設計法に関する 研究  (主査)				
論 文 審 査 委 員	教授	城戸	健一	教授	二村 忠元
	教授	柴山	乾夫	教授	清水 洋

## 論 文 内 容 要 旨

### 1 序 論

コンデンサマイクロホンは、その電気音響変換に係る設計法についてはすでに確立したものであると云うことができる。

しかし、最近特に放送用をはじめとして、使用上の問題から、マイクロホンを超小型化することが強く要請され、設計上の問題点はこのような外部的問題に移行している。

この要請に対応するために、従来の設計法を再検討してみると、いくつかの矛盾点やあいまいさを指摘できる。その理由は、従来マイクロホンをシステムの一部品として評価し、設計する基準が明確でなかったためである。たとえば、従来の感度を基準とした設計法では、感度増加の方法として膜－電極間隔の拡大と成極電圧の上昇が行われるが、そのこと自身は正当であっても、

一方では静電容量の減少から雑音の増加を惹起するなど、システム全体としてみるとかなり問題があった。而して、このことに由来して要求される性能のマイクロホンが実現できなかったとも云える。

本研究はこのような矛盾点やあいまいさに対し、合理的な設計指標をあたえ、音響信号の伝送と云う一つのシステムの部品としてのマイクロホンの設計法を明確にし、その結果の例として、要求性能にもとづく超小型コンデンサマイクロホンの設計法を導き出すものである。

またその設計法の合理性を試作によって実証し、その過程においてコスト、信頼性の面で大巾な改善を加え、さらにその応用としてコンデンサマイクロホンの新しい用途を拓こうとするものである。

## 2 コンデンサマイクロホンの評価法とそれによる設計指針<sup>(1)</sup>

コンデンサマイクロホンの評価は、最終的には、接続される回路も含めた信号対雑音比で評価されることが合理的であると考えられる。この場合、信号としては単位音圧当りの出力電圧すなわち感度をとり雑音としては成極電圧供給用抵抗  $R$  と、インピーダンス変換器の雑音  $N$  をとる。

したがって一般の回路条件においては、信号対雑音比  $S/N$  は、

$$(S/N)_{(f_0 \cdot \frac{1}{3})} = K \cdot \frac{C_0}{C_0 + C_s} \cdot \frac{\sqrt{d}}{\omega_r \sqrt{\mu \sigma}} \cdot \frac{1}{\sqrt{N^2_{(f_0 \cdot \frac{1}{3})} + \frac{(9.65 \times 10^{-12})^2}{(C_0 + C_s)^2 R f_0}}} \quad \dots\dots (2-11)$$

であらわされる。こゝで  $(f_0 \cdot \frac{1}{3})$  なる添字は、中心周波数を  $f_0$  とした  $1/3$  オクターブ帯域における値であることをあらわし、 $K$  は膜の振動姿態によって決まる定数、 $C_0$  はマイクロホンの静電容量、 $C_s$  は浮遊容量、 $d$  は膜と背電極の間隔、 $\omega_r$  は共振角周波数、 $\mu$  は安定度、 $\sigma$  は膜の面密度である。

(2-11) 式中右辺第 1 ～ 3 項で感度をあらわしていて、それが最大となる条件は  $C_0 = C_s$  であり、また (2-11) 式全体が最大値をとるのは、膜電極間隔  $d$  が

$$d = \frac{\frac{\epsilon_0 S b}{9.65 \times 10^{-12}}}{N_{(f_0 \cdot \frac{1}{3})} \sqrt{R f_0}} - C_s \quad \dots\dots (2-14) \quad S b: \text{背電極面積}$$

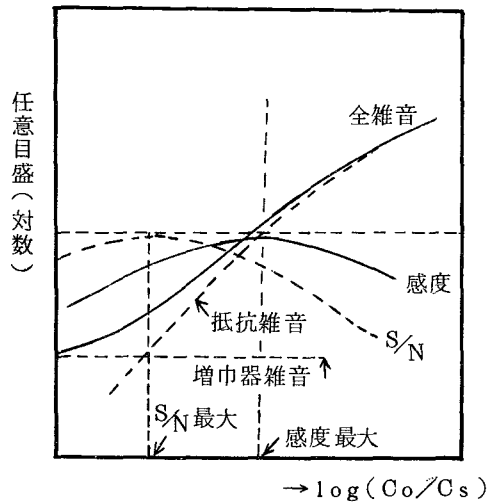
となったときで両者は異なる。Fig(2-9)にこれを示す。

一般に特に低音域を中心としてみれば，  
 $N(f_0 \cdot \frac{1}{3})$ は無視できて，この場合には

$$(S/N)_{(f_0 \cdot \frac{1}{3})} = K \cdot \frac{C_0}{C_0 + C_s} \cdot \frac{\sqrt{d}}{\omega_r \sqrt{\mu \cdot \sigma}} \cdot \frac{(C_0 + C_s) \sqrt{R f_0}}{9.65 \times 10^{-12}} \dots (2-9)$$

すなわち感度をGとおけば設計条件として

$$G(C_0 + C_s) \geq \frac{9.65 \times 10^{-12}}{\sqrt{R f_0}} \cdot (S/N)_{(f_0 \cdot \frac{1}{3})} \dots (2-10)$$



Fig(2-9)

がえられ，信号対雑音比を設計の基準とす

る場合には設計上のパラメータは感度と静電容量の積をとるべきであることがわかる。

### 3 信号対雑音比に基づく放送用コンデンサ マイクロホンの設計法<sup>(2)</sup>

原音場における騒音を含む音声信号が，マイクロホンによって收音され，マイクロホンの雑音が混入するモデルを考えると，表1がえられる。ただし收音距離は発声者から $\ell(m)$ ，マイクロホンの距離係数はQ，騒音レベルを $L_N$ とする。

	原音場	再生音場
信号(音声)	$L_s / \ell$	$L'_s$
雑音	$L_N / Q$	$\frac{L_s}{L_s} \sqrt{\frac{\ell^2}{Q^2} L_N^2 + \frac{\ell^2}{G^2} (N^2 + \frac{(9.65 \times 10^{-12})^2}{(C_0 + C_s)^2 R f_0})}$

表 1

信号音圧 $L_s$ は， $\ell=1m$ のときに65.4 dBspL， $L'_s$ は放送受聴の際の基準数値として64.5 dBspLがあたえられており， $L_s \div L'_s$ とおくことができる。

再生音場において，原音場の騒音に増加を検知させないことを設計の基準とすれば，その増加の検知限 $\Delta I_{f_0}$ を用いて，表1から次の式が導かれる。

$$20 \log \frac{\ell}{Q} L_N(f_0 \cdot \frac{1}{3}) + \Delta I_{f_0} \geq 20 \log \sqrt{\frac{\ell^2}{Q^2} L_N^2(f_0 \cdot \frac{1}{3}) + \frac{\ell^2}{G^2} (N^2(f_0 \cdot \frac{1}{3}) + \frac{(9.65 \times 10^{-12})^2}{(C_0 + C_s)^2 R f_0})} \dots (3-3)$$

雑音増加量の検知限 $\Delta I_{f_0}$ は、 $\Delta I = 10 \log(1.0 + 1.5c + 1.5b I_0/I)$  であたえられており、雑音の感覚レベルの逆数 $I_0/I$ に依存する。 $(b=0.066, c=1.333)$

$L_N$ として実働中のスタジオ騒音の実測値をもちい、各帯域での $\Delta I_{f_0}$ を算出して数式近似を行って(3-3)式に代入すると

$$\frac{\sqrt{3}}{Q} \ell \sqrt{(2.37 \times 10^{-3})^2 \frac{1}{f_0} + (8.42 \times 10^{-7}) f_0} \geq \frac{\ell}{G} \sqrt{N^2 (f_0 \cdot \frac{1}{3}) + \frac{(9.65 \times 10^{-12})^2}{(C_0 + C_s)^2 R f_0}} \quad \dots (3-7)$$

がえられ、低音域、高音域を夫々比較すると

$$(C_0 + C_s) \sqrt{R} \geq 2.36 \times 10^{-9} G/Q \quad \dots (3-9)$$

$$N(f_0 \cdot \frac{1}{3}) \leq 1.46 \times 10^{-6} \sqrt{f_0} Q/G \quad \dots (3-10)$$

なる設計基準数値がえられる。

本文では、具体的設計例を示してある。

#### 4 小型化コンデンサ マイクロホンの定数の限界<sup>(3)</sup>

設計上で信号対雑音比に係る定数のうち、外部条件としてあたえられるものを除くと、膜の面密度 $\sigma$ 、共振角周波数 $\omega_r$ および膜一電極間隔 $d$ が残される。

これらは

$$S/N \propto \sigma^{-\frac{1}{2}} \cdot \omega_r^{-1} d^{-\frac{1}{2}} \quad \dots (4-1)$$

なる関係を有し、最小値をとることが望ましい。

いずれも振動系の機械インピーダンスレベルによって規制されるもので、その最小値は、膜の放射インピーダンスとなる。膜一電極間の空気層の影響を除いた場合、 $d$ は機械インピーダンスとは無関係となり、理論上とりうる感度支配量の最大値は、Fig(4-5)となる。

この値は、実用上は張力の下限

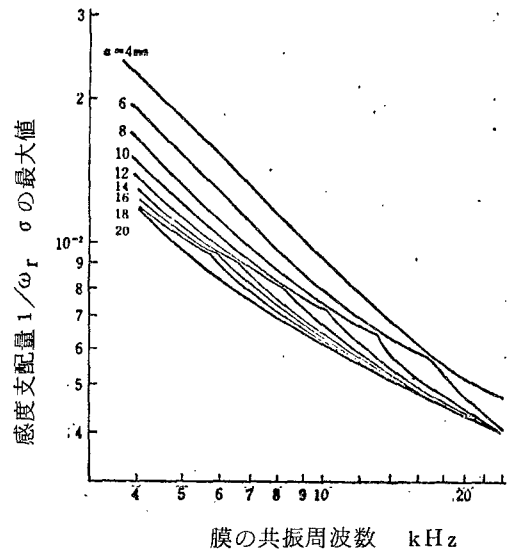


Fig.(4-5) 感度支配量 $1/\omega_r \sqrt{\sigma}$ の理論最大値

( $10\text{ N/m}$ )あるいは、膜の面密度の下限( $5 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^2$ )によって決定される。具体的数値例は本文に記した。

## 5 超小型コンデンサ マイクロホンの設計<sup>(4),(5)</sup>

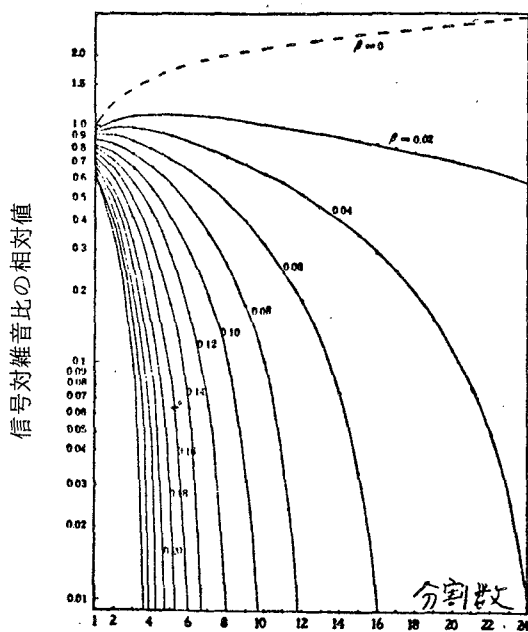
設計は、外径寸法の決定から開始される。これは、視覚的要素を含めて実験的に外径  $8\text{ mm}$ と決定された。このことは、機構的に膜の有効径を  $4\text{ mm}$ とせしめる。

膜の機械インピーダンスは、前章までの検討にしたがって最小であることを要求されるが、これにともない膜—電極間の空気層による制動抵抗を減少させなければならない。そのためには、膜—電極間隔を広げるか、又は背電極の分割等の方法がとられる。前者の方式では、すでに論じたとおり信号対雑音比は保証できず、後者の場合にも、静電容量の減少によって、信号対雑音比はかえって劣化する。

Fig(5-5)は電極の径に対する加工溝巾の割合 $\beta$ をパラメータとしてこの関係を示したもので、マイクロホンが小型化されると特に $\beta$ が大きくなって従来の設計法が役に立たなくなることがわかる。すなわち、背電極を電極としての平板性と、制動壁としての平板性を兼用した従来の設計法から離れ、電極材料自身の音響特性によって制動を行う必要が生じた。

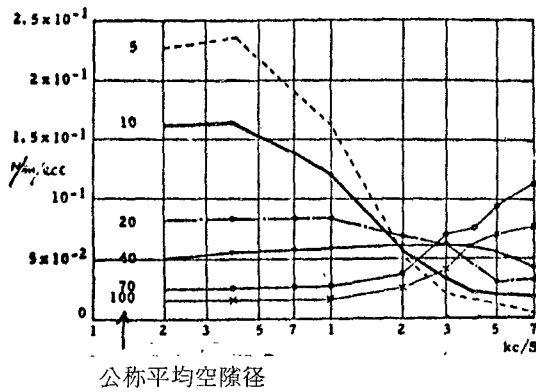
本文においては、その材料の例として多孔性金属について音響特性、電気的特性を調査した結果、適性が認められ、これを用いて設計試作がなされている。

Fig(5-12), (5-16), (5-17)にその例を示す。



Fig(5-5)背電極の分割による有効面積の減少に起因するS/N劣化

(a) Real part



(b) Imaginal part

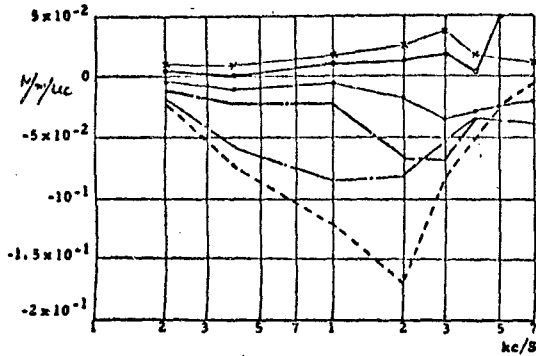


Fig (5-12) 多孔性金属の端面のインピーダンスの例

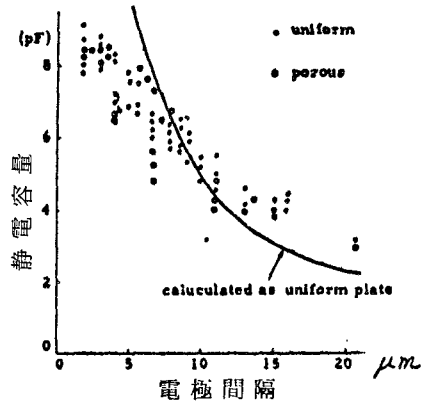


Fig (5-16) 電極としての特性 (I)

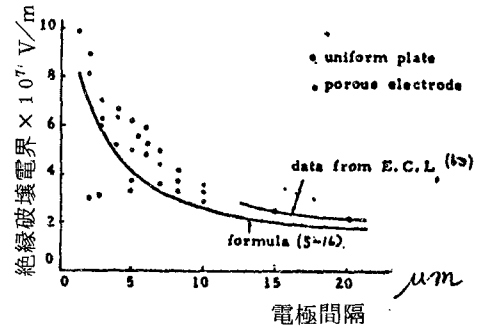


Fig (5-17) 電極としての特性 (II)

## 6 超小型コンデンサ マイクロホンの試作

試作の前提として、従来のコンデンサマイクロホンと異なり、大量生産を考慮してある。そのため若干の構造的特徴をもっている。まず接着を基本としていること、膜の押し上げに絶縁物を用いていることで、これらは対環境特性の向上に大きく寄与している。約1000ケの試作結果として、95.5%の範囲でのバラツキを以下に示す。

電極及び膜の径  $\pm 0.02$

浮遊容量  $\pm 0.17$

膜の面密度  $\pm 0.09$

共振周波数  $\pm 0.05$

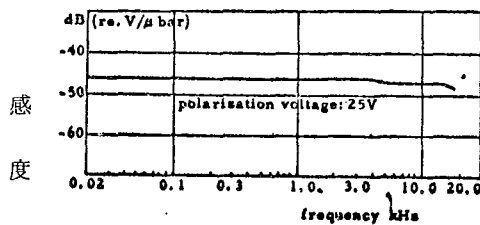
膜一電極間隔  $\pm 0.13$

これらの結果マイクロホンの特性としては

静電容量  $\pm 0.020$

感度  $\pm 2.15 \text{ dB}$

安定度  $5.14 \pm 2.98$



Fig(5-21) 試作品の特性の例

となり、また対環境特性の結果として

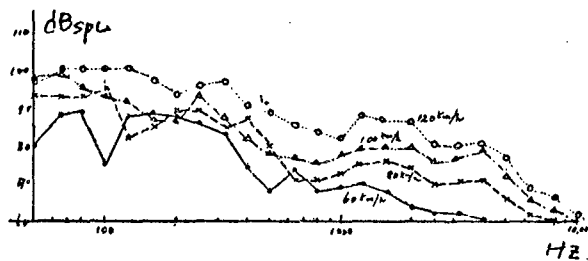
(1)  $40^\circ\text{C}$ , 95% 100H, (2)  $100^\circ\text{C}$  100H,

(3) 2500 r.p.m. 5G 20H, (4) 屋外放置1000H

のいずれの試験にも合格することがわかった。

## 7 コンデンサ マイクロホンの用途の拡張

前章までに述べた超小型コンデンサマイクロホンの設計、試作の結果、新しい用途として、高速気流中での計測用マイクロホン、野外用微気圧変動センサ、および放送用超小型ワイヤレスマイクロホンについての概要を紹介しているが、ここでは高速気流用マイクロホンによる実用例<sup>(6)</sup>を掲げるに留める。



Fig(7-16) 高速気流用マイクロホンによる

自動車排気騒音の測定例

## 8 結 論

コンデンサマイクロホンの設計法の合理化、最適化に着目し、1例として超小型コンデンサマイクロホンの設計と、その裏づけとなる試作結果について述べた。

本研究の基本的考え方は、まずマイクロホンをシステムの部品として評価し、設計基準をあきらかにすること、次にその結果にもとづいてマイクロホンを設計する際、従来の方法では実現範囲に限界があり、原理を同じくしても構成法に新しい考え方をとり入れる必要があると云うことである。

このような考え方にもとずき、設計の基準として信号対雑音比を導入し、これを基準として各定数の関係をあきらかにし、つぎに放送と云う一つのシステムを例としてこれら定数のとるべき



数値をあきらかにした。

具体的な設計においては，従来の設計法では実現不可能であることを示し，これに代って背電極材料に新しい考え方を導入した結果，合目的的な設計が可能となった。

また，上記設計に対する裏づけとして，試作を通じて生産に関連する諸量を解析した結果，十分な実用性を有し，さらに信頼性にもすぐれていることが明らかとなった。

## 参 考 文 献

- (1) 利光平大：日本音響学会誌 Vol.28 p.461 (1972)
- (2) 利光平大：日本音響学会誌 Vol.28 p.467 (1972)
- (3) 利光平大：National Tech.Rept. Vol.18 p.320 (1972)
- (4) Y.RIKOW：67 IEEE Convention Record (1967)
- (5) 利光平大：日本音響学会誌（投稿中，Vol.29 No.5 予定）
- (6) 利光平大ほか：日本音響学会講演論文集 昭和44年5月 1-3-5

## 審 査 結 果 の 要 旨

コンデンサ・マイクロホンにはすぐれた周波数特性と安定性をもたせることができるために、制御の容易な指向特性も含めて、古くから、これに関する理論的、解析的な研究がよく行われ、計測用、標準用のマイクロホンとしてはコンデンサ・マイクロホンを使うのが常識となり、これに関する研究はすでに終了したかの感さえも与えてきている。しかし放送用等の用途には、十分な信号対雑音比をもたせることが困難な場合が多く、一般には使いにくいものとされていたにもかかわらず、その改善に関する適切な研究は行われないうままになっていた。

これに対して、著者は、マイクロホンをシステムの機能部品として考えた設計を行うべきであるという主張の下に、従来とは異なった視点に立つ体系的な設計法を確立した。本論文は、その研究をまとめたもので、8章から成る。

第1章は序論である。

第2章で、著者は、コンデンサ・マイクロホンの評価を信号対雑音比をもって行うことを提案し、このためには感度と自己容量の積をパラメータとして扱うべきであることを明らかにし、それを用いた設計法を述べている。第3章では、テレビジョン放送というシステムを例として取り上げ、前章で提案したパラメータを用いて数値的検討を加え、使用環境によって決定される信号対雑音比をマイクロホンによって劣化させないために要求される性能を明らかにしている。さらに、第4章においては、コンデンサ・マイクロホンの設計上必要な各種の音響振動系のとり得る特性の限界について考察を加え、理論上の限界と、実用上とり得る範囲とを示している。以上の3章の研究により明らかにされた放送等の一般の用途を目的としたコンデンサ・マイクロホンの設計に関する基本的な考え方と方法とは、本研究の根幹をなすもので、これが明らかにされたことは高く評価されるべき成果であると言える。

第5章では、前章までに述べた諸条件を基礎として、これに放送現場の要請をとり入れ、具体的な設計例として超小型コンデンサ・マイクロホンを実現する方法について述べている。すなわち、従来の設計値が放送システムの要求する性能を満たし得ない理由を説明し、その解決を行うための設計法を提案し、具体的な実現方法を述べ、設計、試作の結果を示し、本研究の主な成果をここに結集している。

第6章は、コンデンサ・マイクロホンの製造について、大量生産を前提として研究した結果を述べたものである。本章の成果は、いわゆる放送用のほか、一般音声、音楽を対象とする分野に高品質のコンデンサ・マイクロホンを広く普及する端緒を開いたものである。

第7章では、前章までに述べたコンデンサ・マイクロホンの特徴を活かすことにより、広い応用の道が開かれる例を示してある。

第8章は結論である。

以上要するに，本論文は，コンデンサ・マイクロホンの設計法に関する研究を，放送システムの一機能部品の設計という立場から行い，使用上の要求にこたえる総合的な設計法を体系化し，かつ，高品質の超小型コンデンサ・マイクロホンを実現したもので，電気音響工学に寄与するところ少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。